

DOI:10.11686/cyxb2025264

http://cyxb.magtech.com.cn

马玉龙, 邱开阳, 骆欣怡, 等. 不同固沙植被恢复模式对土壤理化性质、酶活性和草本植物多样性的影响. 草业学报, 2026, 35(6): 1—12.

MA Yu-long, QIU Kai-yang, LUO Xin-yi, *et al.* Effects of different sand-fixing vegetation restoration modes on soil physicochemical properties, enzyme activities, and herbaceous plant diversity. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(6): 1—12.

## 不同固沙植被恢复模式对土壤理化性质、酶活性和草本植物多样性的影响

马玉龙<sup>1,3,4</sup>, 邱开阳<sup>1,3,4\*</sup>, 骆欣怡<sup>1,3,4</sup>, 张晶晶<sup>2</sup>, 王雨航<sup>1,3,4</sup>, 王国会<sup>1,3,4</sup>, 郑翔<sup>1</sup>, 海旭莹<sup>1</sup>, 薛斌<sup>5</sup>, 谢应忠<sup>1,3,4</sup>

(1. 宁夏大学林业与草业学院, 宁夏 银川 750021; 2. 银川市农业技术推广服务中心, 宁夏 银川 750011; 3. 宁夏草业工程技术创新研究中心, 宁夏 银川 750021; 4. 农业农村部饲草高效生产模式创新重点实验室, 宁夏 银川 750021; 5. 宁夏大学生态环境学院, 宁夏 银川 750021)

**摘要:**为探究不同固沙植被恢复模式对土壤理化性质、酶活性和草本植物多样性的影响,以流动沙地为对照(CK),选取沙鞭(SB)、柠条锦鸡儿(N)、细枝羊柴(H)及柠条锦鸡儿×细枝羊柴混交(NH)4种典型固沙模式进行分析。结果表明:1)相较于流动沙地,灌木固沙模式(N,H,NH)提高了土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)和有效磷(AP)含量。AP含量表现为N>H>SB>NH>CK,柠条锦鸡儿(N)样地的AP含量(8.73 mg·kg<sup>-1</sup>)较CK显著提高了45.5%;TN含量表现为H>N>NH>SB>CK,细枝羊柴(H)样地的TN含量(0.20 g·kg<sup>-1</sup>)较CK显著提高了263%;而SOC含量(1.51 g·kg<sup>-1</sup>)和碳氮比(C/N, 25.13)均在混交(NH)样地达到最大值,较CK分别提高了55.5%和42.8%。2)土壤β-葡萄糖苷酶和碱性磷酸酶活性均在柠条锦鸡儿(N)样地最高,较CK分别显著提高了73.7%和1315.1%;而β-1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶活性排序为SB>NH>CK>H>N,其中沙鞭(SB)样地该酶活性显著最高;β-葡萄糖苷酶与pH、TN及氮磷比(N/P)显著相关,β-1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶与pH显著正相关。3)沙鞭(SB)样地的草本Pielou均匀度指数显著低于灌木固沙样地。草本Simpson优势度指数和Pielou均匀度指数与β-1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶显著负相关,且该酶( $R^2=0.66, P=0.003$ )和碳磷比( $R^2=0.41, P=0.01$ )是影响草本植物多样性的关键因子。综上,不同固沙植被恢复模式通过调控碳磷比和β-1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶活性影响草本植物多样性,混交模式和柠条锦鸡儿分别对碳氮平衡和活化磷素具有重要作用,研究结果可为固沙植被优化配置与可持续治沙提供科学依据。

**关键词:**物种多样性;土壤性质;土壤酶;沙地生态修复

## Effects of different sand-fixing vegetation restoration modes on soil physicochemical properties, enzyme activities, and herbaceous plant diversity

MA Yu-long<sup>1,3,4</sup>, QIU Kai-yang<sup>1,3,4\*</sup>, LUO Xin-yi<sup>1,3,4</sup>, ZHANG Jing-jing<sup>2</sup>, WANG Yu-hang<sup>1,3,4</sup>, WANG Guo-hui<sup>1,3,4</sup>, ZHENG Xiang<sup>1</sup>, HAI Xu-ying<sup>1</sup>, XUE Bin<sup>5</sup>, XIE Ying-zhong<sup>1,3,4</sup>

1. School of Forestry and Grassland Science, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Yinchuan Agricultural Technology Promotion Service Center, Yinchuan 750011, China; 3. Ningxia Grassland and Animal Husbandry Engineering Technology Research Center, Yinchuan 750021, China; 4. Key Laboratory for Model Innovation in Forage Production Efficiency, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yinchuan 750021, China; 5. School of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

收稿日期:2025-06-26;改回日期:2025-09-09

基金项目:宁夏自然科学基金(重点项目)(2023AAC02021),国家自然科学基金项目(32360425),宁夏青年拔尖人才培养项目(宁人社函[2024]236号)和宁夏高等学校一流学科建设项目(NXYLXK2017A01)资助。

作者简介:马玉龙(2001—),男,宁夏泾源人,在读硕士。E-mail: myl2869@163.com

\* 通信作者 Corresponding author. E-mail: kaiyangqiu@nxu.edu.cn

**Abstract:** The aim of this study was to investigate the effects of different types of sand-fixing vegetation restoration on soil physico-chemical properties, soil enzyme activities, and herbaceous plant diversity. The control was bare mobile sand dunes (CK) and the four types of sand-fixing vegetation were *Psammochloa villosa* (SB), *Caragana korshinskii* (N), *Corethroedendron scoparium* (H), and a mixture of *C. korshinskii* and *C. scoparium* (NH). The results show that: 1) Compared with mobile sand dunes, the shrub sand-fixing modes (N, H, NH) increased the contents of soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), and available phosphorus (AP). The treatments were ranked, from highest AP content in soil to lowest, as follows: N>H>SB>NH>CK, with the AP content in *C. korshinskii* (N) plots ( $8.73 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) being 45.5% higher than that in CK. The five treatments were ranked, from highest TN content in soil to lowest, as follows: H>N>NH>SB>CK, with the TN content in *C. scoparium* (H) plots ( $0.20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) being 263% higher than that in CK. Meanwhile, the highest values of SOC content ( $1.51 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) and carbon-to-nitrogen ratio (C/N, 25.13) were in the mixed (NH) plots, and were 55.5% and 42.8% higher than their corresponding values in CK. 2) The highest activities of soil  $\beta$ -glucosidase and alkaline phosphatase were in the *C. korshinskii* (N) plots, and they were significantly higher (by 73.7% and 1315.1%, respectively) than their corresponding values in CK. The treatments were ranked, from highest activity of  $\beta$ -1, 4-N-acetylglucosaminidase in soil to lowest, as follows: SB>NH>CK>H>N, with the highest activity in the *P. villosa* (SB) plots. The soil  $\beta$ -glucosidase activity was significantly correlated with pH, TN, and nitrogen-to-phosphorus ratio (N/P), while  $\beta$ -1, 4-N-acetylglucosaminidase activity was significantly positively correlated with soil pH. 3) The Pielou evenness index of vegetation was significantly lower in the *P. villosa* (SB) plots than in the shrub sand-fixing plots. The Simpson's dominance index and Pielou evenness index of vegetation were significantly negatively correlated with soil  $\beta$ -1, 4-N-acetylglucosaminidase activity. Moreover, this enzyme ( $R^2=0.66$ ,  $P=0.003$ ) and the carbon-to-phosphorus ratio ( $R^2=0.41$ ,  $P=0.01$ ) were identified as key factors affecting herbaceous plant diversity. In summary, different types of sand-fixing vegetation affected the diversity of herbaceous plants by regulating the carbon-to-phosphorus ratio and  $\beta$ -1, 4-N-acetylglucosaminidase activity in soil. Among the different vegetation modes, the mixed mode and *C. korshinskii* played important roles in maintaining the carbon-nitrogen balance and improving the content of available phosphorus, respectively. The findings of this study provide a scientific basis for optimizing sand-fixing vegetation and for promoting the sustainability of desertification control projects.

**Key words:** species diversity; soil properties; soil enzymes; ecological restoration of sandy lands

沙漠化是在干旱和半干旱地区,由于气候变化或人类活动的影响,破坏了生态系统的平衡,形成了以风蚀为主的土地退化<sup>[1]</sup>。目前全球超过40%的土地已经形成沙漠或直接受到沙化的威胁<sup>[2]</sup>。其中风沙活动导致的土壤养分(碳、氮、磷)流失和植被生产力下降,形成“沙化—贫瘠化—再沙化”恶性循环,严重制约区域生态安全与可持续发展<sup>[3]</sup>。因此,过去60年,学者们针对中国风沙沙漠化的控制进行了综合研究<sup>[4]</sup>。在流动沙丘地带设置草方格沙障,可以有效增加地表摩擦力,降低地表风速,从而起到固定沙丘的作用<sup>[5]</sup>。然而,草方格沙障虽能短期内物理固沙,但其持久性依赖于植被的自然恢复或人工辅助种植。

基于此,植物固沙已成为荒漠化治理的长期策略。当前,豆科类植物作为人工固沙先锋种,其固氮功能可显著改善沙地贫瘠的氮素养分。已有研究表明柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)可以通过根瘤共生提升土壤氮储量及水分保持能力<sup>[6]</sup>。在腾格里沙漠东北缘,种植细枝羊柴(*Corethroedendron scoparium*)固沙相较于流沙地分别显著提高了土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)、全氮(total nitrogen, TN)和全磷(total phosphorus, TP)73.2%、50.0%和145.5%<sup>[7]</sup>。研究表明,在草方格内种植耐旱植物,既有利于土壤养分的积累<sup>[8]</sup>,又能显著提高土壤酶活性。Zhang等<sup>[9]</sup>研究表明在流动沙丘,土壤脲酶、过氧化氢酶和蔗糖酶活性显著低于植被恢复区。尽管如此,现有研究多聚焦单一物种的生态功能,关于不同配置模式对土壤多功能的协同调控机制研究仍存在不足。

土壤作为生态恢复的物质基础,其支撑植物所必需的生长介质以及养分、水分和空气等其他生长条件<sup>[10]</sup>。而

土壤酶作为土壤组分中最活跃的有机成分之一<sup>[11]</sup>,其活性的强弱是评价土壤肥力和生态修复效果的重要生物指标<sup>[12]</sup>。针对本研究聚焦的沙地生态系统,碳氮磷匮乏是制约植被恢复的核心瓶颈,因此选择土壤 $\beta$ -葡萄糖苷酶、纤维素酶、 $\beta$ -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶和碱性磷酸酶作为关键测定指标: $\beta$ -葡萄糖苷酶与纤维素酶是驱动土壤碳循环的核心功能酶,参与纤维素的降解过程; $\beta$ -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶是氮循环中几丁质降解的关键酶;碱性磷酸酶直接调控土壤中有机磷的矿化过程<sup>[13]</sup>。已有研究表明土壤蔗糖酶活性与速效钾(available potassium, AK)、有效磷(available phosphorus, AP)、铵态氮含量显著正相关( $P < 0.05$ );过氧化氢酶和磷酸酶活性与土壤全碳(TC)、TN、TP、AK、含水率均呈显著正相关( $P < 0.05$ )<sup>[14]</sup>。在沙地生态系统中,赵丽娅等<sup>[15]</sup>发现草本植物作为沙地先锋群落,其多样性与生物量对土壤功能变化极为敏感。此外,已有研究表明土壤有机质含量和土壤 pH 是影响草本植物群落演替的主要环境因子<sup>[16]</sup>。因此,解析不同固沙模式下“土壤理化—酶活性—植物”系统的协同效应,成为突破植被恢复技术瓶颈的关键。

本研究以流动沙地及不同固沙植被恢复模式[沙鞭(*Psammochloa villosa*)、拧条锦鸡儿、细枝羊柴、拧条锦鸡儿×细枝羊柴混交]为对象,通过分析不同植被恢复模式下土壤理化性质、关键酶活性及草本植物多样性的差异,旨在阐明以下两个科学问题:1)拧条锦鸡儿与细枝羊柴混交能否通过调控土壤养分和酶活性,产生优于单一纯林的协同效应,从而更有效地促进土壤综合肥力的提升? 2)土壤酶活性是否是连接固沙植物与草本植物多样性形成的关键中介? 其相对重要性如何? 研究结果可为干旱区植被配置优化与生态系统服务提升提供数据支撑和理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于宁夏白芨滩国家级自然保护区(37°49′05″—38°20′54″ N, 106°20′22″—106°37′19″ E),地处毛乌素沙地西南缘和引黄灌区东部的荒漠区域。该区域气候类型属于典型的大陆性季风气候,全年日照充足,干旱少雨,蒸发强,多年平均降水量为 255.2 mm,年平均蒸发量为 2862.2 mm。境内属于多风地区,全年大风(17 m·s<sup>-1</sup>以上)日数为 63 d。土壤类型以风沙土和灰钙土为主。

### 1.2 试验设计

在自然保护区内固沙恢复区选取 2002 年建植的不同植物固沙模式,包括拧条锦鸡儿(N)、细枝羊柴(H)、拧条锦鸡儿×细枝羊柴混交(NH)和沙鞭(SB),以流动沙丘为对照(CK),每个固沙模式内分别设置 100 m×100 m 的平坦样地 5 个,各样地之间地形条件一致,灌丛密度相近(表 1)。在每个样地内设置 1 个 10 m×10 m 的样方用于调查灌木群落特征,并在每个灌木样方内随机布设 3 个 1 m×1 m 的草本样方,记录草本植物物种数及各物种的盖度、高度、多度、频度,并将草本地地上部分齐地面收割,装入信封袋,带回实验室,先进行 105 °C 高温杀青处理 30 min,然后在 65 °C 下烘干至恒重后测定其地上生物量。

表 1 研究区不同固沙样地基本特征

Table 1 Basic characteristics of the different sand-fixing plots in the study area

样地类型 Sample plot type	营造方式 Establishment method	平均高度 Average height (cm)	密度 Density (plant/clump·m <sup>-2</sup> )
沙鞭 <i>P. villosa</i>	草方格固沙+雨季人工播种 Straw checkerboard sand-fixing+artificial seeding in rainy season	45.76	13~30
拧条锦鸡儿 <i>C. korshinskii</i>	草方格固沙+雨季人工播种 Straw checkerboard sand-fixing+artificial seeding in rainy season	163.43	0.05~0.13
细枝羊柴 <i>C. scoparium</i>	草方格固沙+雨季人工播种 Straw checkerboard sand-fixing+artificial seeding in rainy season	154.74	0.12~0.21
拧条锦鸡儿×细枝羊柴 <i>C. korshinskii</i> × <i>C. scoparium</i>	草方格固沙+雨季人工播种 Straw checkerboard sand-fixing+artificial seeding in rainy season	152.87	0.07~0.17

样方调查于2023年9月26日—10月3日植物生长后期进行。在植物调查的同时进行土壤采样,在每个灌木样方内,首先去除采样点的地表植物、苔藓、枯落物、根系和土壤动物等残留物,随后按照梅花形选取5个取样位置,用直径为4 cm的土钻收集0~10 cm的土壤样品,把每个样方内采集的土壤样品混合均匀形成一个样品。取部分混合样装入铝盒,立即称量湿重并带回实验室测定土壤水分(烘干法);剩余样品风干后一部分进行土壤理化性质分析,另一部分用于测定土壤酶活性。

### 1.3 土壤理化性质与酶活性测定

参照鲍士旦<sup>[17]</sup>的方法,土壤水分(soil moisture, SM)采用烘干法测定;土壤pH与电导率(electrical conductivity, EC)分别采用酸度计(PHS-3D,上海三鑫仪器生产,中国)和电导率仪(DDS-307A,上海佑科仪器有限公司,中国)测定;土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)和全磷(TP)含量分别通过重铬酸钾氧化—外加热法、凯氏定氮法和NaOH熔融—钼锑抗比色法测定;有效磷(AP)和速效钾(AK)含量分别采用 $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaHCO<sub>3</sub>法和NH<sub>4</sub>OAc浸提—火焰光度法测定。所有酶活性测定均按照北京索莱宝科技有限公司的相应试剂盒说明书进行操作,采用荧光底物微孔板法测定,具体测定方法参照关松荫<sup>[18]</sup>的《土壤酶及其研究法》:β-葡萄糖苷酶(S-BG)采用对硝基苯酚法;纤维素酶(S-CL)采用2,3-二硝基水杨酸法;β-1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶(S-NAG)分解β-N-乙酰氨基葡萄糖苷生成对硝基苯酚,并在400 nm波长下测定其吸光度升高速率以计算酶活性;碱性磷酸酶(S-AKP)则采用磷酸苯二钠比色法测定。所有土壤理化性质和酶活性的分析测定均在西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地完成。

### 1.4 数据处理

依据陈波兰等<sup>[19]</sup>的方法计算植物多样性指标。

重要值=(相对高度+相对盖度+相对密度+相对频度)/4

物种丰富度指数(species richness index, R):  $R = S$

优势度指数(Simpson index, D):  $D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$

香农—威纳指数(Shannon—Wiener index, H'):  $H' = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$

均匀度指数(Pielou index, E):  $E = (- \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i) / \ln S$

式中:S为物种数目; $P_i$ 为第*i*物种的相对重要值。

首先使用Excel 2019对原始数据进行排序及基础计算;随后运用SPSS 26.0统计软件对每个指标进行方差齐性检验、正态性检验。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)分析各个指标的组间差异,在方差分析显著的前提下,采用最小显著差异法(least significant difference, LSD)进行多重比较,以确定不同处理组间的具体差异;利用Pearson相关性分析土壤理化性质、酶活性及草本物种多样性之间的关系;使用R语言(4.4.0版本)的“vegan”, “ggplot2”和“ggrepel”包进行冗余分析(RDA)和方差分解分析(VPA),以检验土壤理化性质和酶活性对草本植物多样性的相对重要性。最终通过Origin 2025完成数据可视化,绘制柱状图表。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同固沙植被恢复模式对土壤理化性质的影响

由图1可知,相比于CK样地,固沙植物种植明显增加了土壤TN、AP和AK,降低了土壤SM。具体而言,灌木固沙模式(N, H, NH)增加了SOC的含量,而沙鞭(SB)样地土壤SOC含量反而比CK低。细枝羊柴(H)样地的TN含量( $0.20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )和N/P(0.82)显著高于其他样地( $P < 0.05$ )。AP与AK含量变化趋势一致,其中柠条锦鸡儿(N)样地的AP含量达 $8.73 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,较CK提升45.5%,而CK样地的AK含量显著低于其他样地( $P < 0.05$ )。土壤碳氮比(C/N)排序依次为NH>CK>SB>N>H,其中混交(NH)样地的C/N(25.13)显著高于柠条锦鸡儿(N)样地和细枝羊柴(H)样地( $P < 0.05$ )。所有样地土壤均呈碱性(pH为8.35~8.75),但柠条锦鸡儿(N)样地土壤pH显著低于其他样地( $P < 0.05$ )。

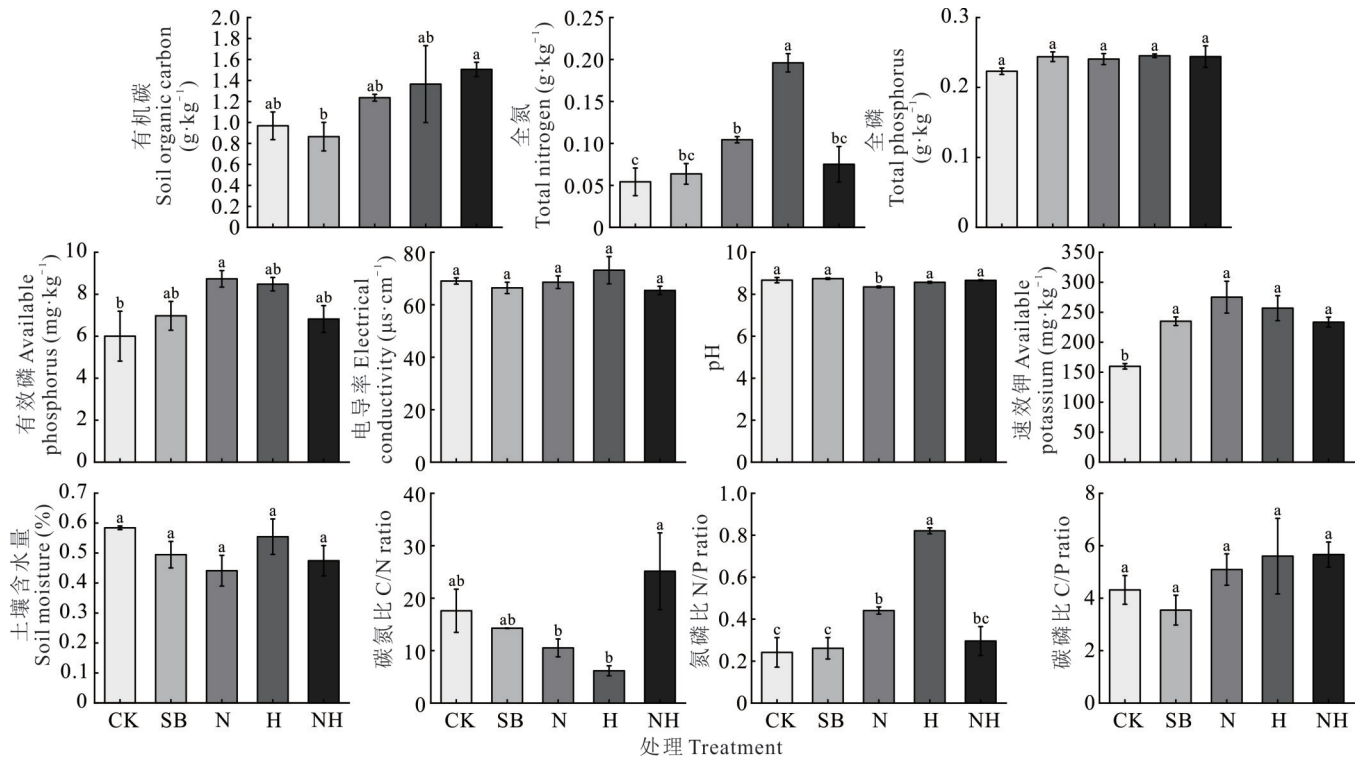


图 1 不同固沙模式下土壤理化性质的变化

Fig. 1 Change of soil physico-chemical properties under different sand-fixing modes

不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different lowercase letters indicate significant differences at the 0.05 level. CK: 流动沙地 Mobile sand dune; SB: 沙鞭 *P. villosa*; N: 柠条锦鸡儿 *C. korshinskii*; H: 细枝羊柴 *C. scoparium*; NH: 柠条锦鸡儿 × 细枝羊柴混交 Mixed plantation of *C. korshinskii* × *C. scoparium*. 下同 The same below.

2.2 不同固沙植被恢复模式对土壤酶活性的影响

不同固沙模式下土壤酶活性变化如图 2 所示, 相比于 CK 样地, 植物固沙显著增加了土壤 β-葡萄糖苷酶和碱性磷酸酶活性 ( $P < 0.05$ )。其中土壤 β-葡萄糖苷酶和碱性磷酸酶活性均呈现 N > H > NH > SB > CK 的趋势, 柠

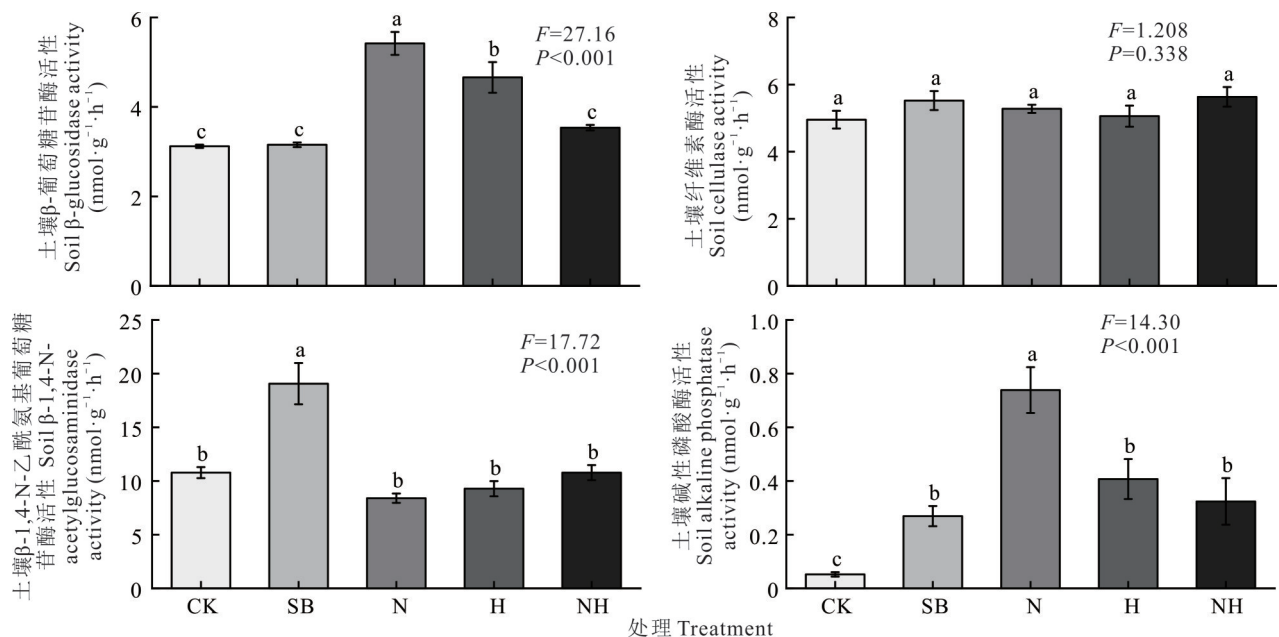


图 2 不同固沙模式下土壤酶活性的变化

Fig. 2 Changes of soil enzyme activities under different sand-fixing modes

条锦鸡儿(N)样地土壤 $\beta$ -葡萄糖苷酶( $5.42 \text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ )和碱性磷酸酶( $0.74 \text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ )活性显著高于其他固沙模式( $P<0.05$ )。相比之下,土壤纤维素酶活性在所有处理组间均未表现出显著差异( $P>0.05$ )。此外,沙鞭(SB)样地的土壤 $\beta$ -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶活性( $19.07 \text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ )显著高于其他固沙模式( $P<0.05$ )。

### 2.3 不同固沙植被恢复模式对草本植物多样性及生物量的影响

从表2可以看出,雾冰藜是不同固沙模式下的主要草本优势种;拧条锦鸡儿(N)样地的Simpson指数显著高于沙鞭(SB)样地( $P<0.05$ ),沙鞭(SB)样地的Pielou均匀度指数显著低于灌木固沙模式样地(N、H、NH)( $P<0.05$ )。草本生物量在不同固沙模式下呈现SB>N>H>NH的递减趋势,其中混交(NH)样地的生物量显著低于沙鞭(SB)样地( $P<0.05$ ),而其他处理间无显著差异( $P>0.05$ )。

表2 不同固沙模式下草本植物种类组成、物种多样性特征及地上生物量

Table 2 Species composition, species diversity characteristics and aboveground biomass of herbaceous plants under different sand-fixing patterns

	项目 Item	SB	N	H	NH	F	
重要值	雾冰藜 <i>Grubovia dasphylla</i>	0.015	0.304	0.273	0.188		
Importance value	刺沙蓬 <i>Salsola tragus</i>	0.151		0.415	0.312		
	黑沙蒿 <i>Artemisia ordosica</i>	0.015		0.006			
	短花针茅 <i>Stipa breviflora</i>	0.042	0.018	0.039	0.071		
	猪毛菜 <i>Salsola collina</i>		0.431				
	软毛虫实 <i>Corispermum puberulum</i>		0.158	0.193	0.356		
	沙鞭 <i>P. villosa</i>	0.733					
	沙米 <i>Agriophyllum pungens</i>		0.089	0.034	0.065		
	狗尾草 <i>Setaria viridis</i>			0.037	0.004		
	阿尔泰狗娃花 <i>Aster altaicus</i>	0.008					
	九顶草 <i>Enneapogon desvauxii</i>	0.003					
	虎尾草 <i>Chloris virgata</i>			0.003			
	猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i>	0.032		0.006	0.004		
	物种丰富度指数 Species richness index		5.00±0.71a	3.60±0.55a	4.20±2.16a	3.60±0.89a	1.40ns
	Simpson优势度指数 Simpson's dominance index		0.44±0.08b	0.58±0.08a	0.55±0.14ab	0.56±0.05ab	2.30ns
Shannon-Wiener多样性指数 Shannon-Wiener diversity index		0.81±0.10a	0.99±0.18a	0.99±0.40a	0.96±0.06a	0.74ns	
Pielou均匀度指数 Pielou's evenness index		0.51±0.07b	0.78±0.11a	0.73±0.10a	0.78±0.15a	6.64**	
地上生物量 Aboveground biomass ( $\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$ )		79.64±12.89a	62.48±24.18ab	60.48±17.51ab	40.30±12.03b	4.31*	

注:SB:沙鞭;N:拧条锦鸡儿;H:细枝羊柴;NH:拧条锦鸡儿×细枝羊柴混交;F:不同样地之间植物多样性指数的差异。\*:  $P<0.05$ ; \*\*:  $P<0.01$ ; ns:  $P>0.05$ 。不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

Note: SB: *P. villosa*; N: *C. korshinskii*; H: *C. scoparium*; NH: Mixed plantation of *C. korshinskii*×*C. scoparium*. F: Differences in plant diversity indices among different sampling sites. \*:  $P<0.05$ ; \*\*:  $P<0.01$ ; ns: not significant ( $P>0.05$ ). Different lowercase letters indicate significant differences at the 0.05 level.

### 2.4 土壤理化特性与酶活性及草本植物多样性的相关性分析

如图3所示,草本植物Simpson优势度指数和Pielou均匀度指数与土壤 $\beta$ -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶(S-NAG)显著负相关( $P<0.01$ );地上生物量(AGB)与SOC、C/N和C/P显著负相关( $P<0.05$ ),与土壤 $\beta$ -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶(S-NAG)呈显著正相关( $P<0.05$ );同时,土壤 $\beta$ -葡萄糖苷酶(S-BG)与土壤TN和N/P显著正相关,与pH显著负相关;土壤碱性磷酸酶(S-AKP)与土壤pH极显著负相关( $P<0.001$ );与之相反,土壤 $\beta$ -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶(S-NAG)与土壤pH显著正相关。此外,土壤纤维素酶(S-CL)和土壤理化性质之间没有显著相关性。

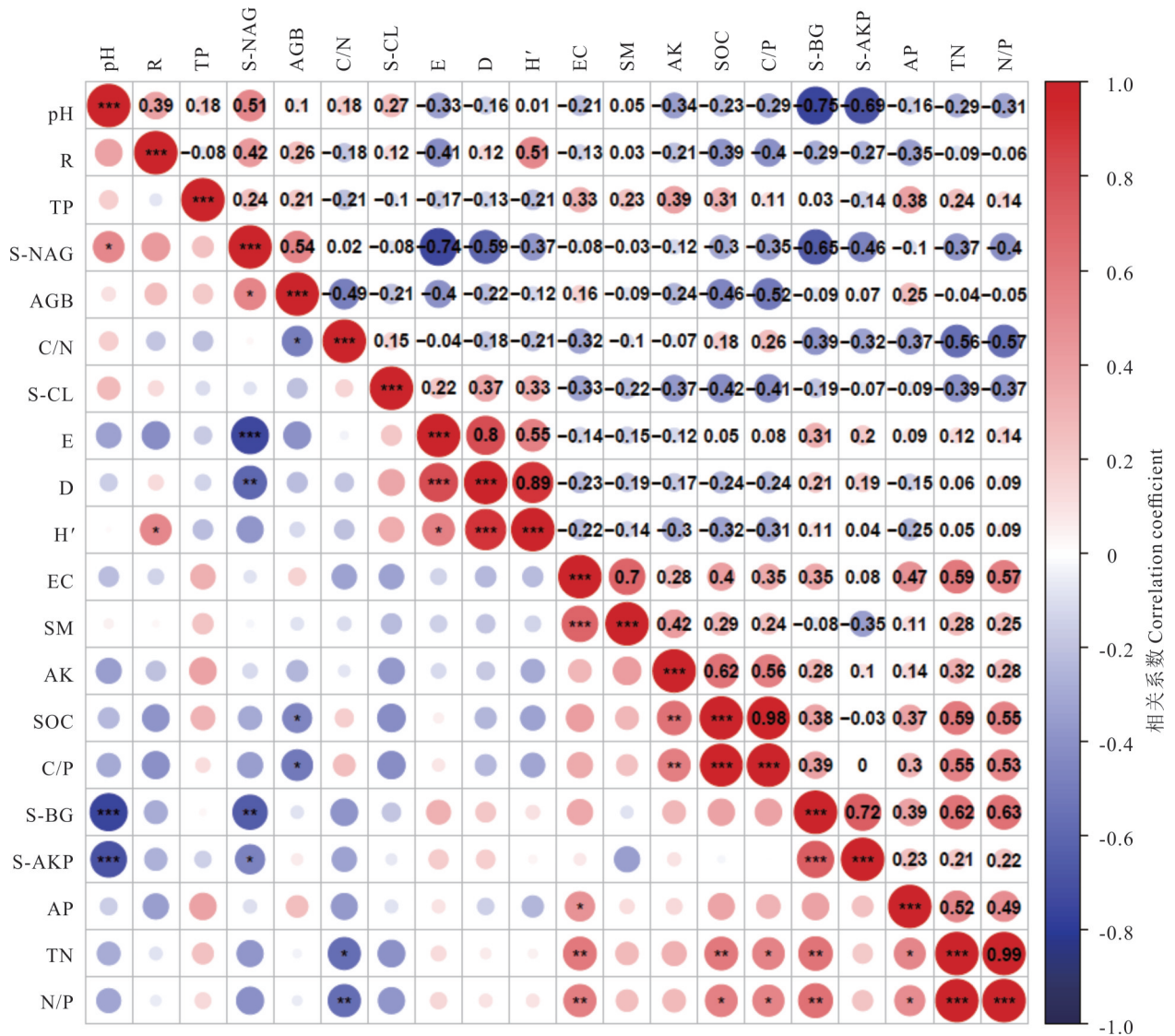


图 3 不同固沙模式下土壤理化性质、酶活性及草本植物多样性的 Pearson 相关性分析

Fig. 3 Pearson correlation analysis of soil physico-chemical properties, enzyme activities and herbaceous plant diversity under different sand-fixing modes

红色表示正相关,蓝色表示负相关;\*,\*\*和\*\*\*表示在 0.05,0.01 和 0.001 水平上显著相关。Red indicates positive correlation, blue indicates negative correlation; \*, \*\* and \*\*\* represent significant correlation at 0.05, 0.01 and 0.001 levels. S-BG: 土壤 β-葡萄糖苷酶 Soil β-glucosidase; S-CL: 土壤纤维素酶 Soil cellulase; S-NAG: 土壤 β-1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶 Soil β-1,4-N-acetylglucosaminidase; S-AKP: 土壤碱性磷酸酶 Soil alkaline phosphatase; N/P: 氮磷比 N/P ratio; TN: 全氮 Total nitrogen; AK: 速效钾 Available potassium; TP: 全磷 Total phosphorus; SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon; EC: 电导率 Electric conductivity; C/P: 碳磷比 C/P ratio; SM: 土壤水分 Soil moisture; AP: 有效磷 Available phosphorus; C/N: 碳氮比 C/N ratio; R: 物种丰富度 Species richness; D: 辛普森优势度指数 Simpson's dominance index; H': 香农-威纳多样性指数 Shannon-Wiener diversity index; E: Pielou 均匀度指数 Pielou's evenness index; AGB: 地上生物量 Aboveground biomass. 下同 The same below.

由图 4 可以看出,不同固沙模式下土壤理化性质与酶活性对草本植物多样性及生物量的影响存在显著差异。沙鞭(SB)样地的土壤理化性质及酶活性与其他灌木固沙样地(N,H,NH)差异显著( $P < 0.05$ ),而不同灌木固沙样地间的土壤理化性质和酶活性则呈现较高相似性。土壤理化性质与酶活性共同解释了草本植物多样性和生物量(AGB)93.18%的变异(轴 1:73.03%,轴 2:20.15%),其中土壤 β-1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶(S-NAG)活性( $R^2=0.66, P=0.003$ )和 C/P( $R^2=0.41, P=0.010$ )对变异的解释贡献较为显著。进一步方差分解(VPA)显示,土壤酶活性对草本群落特征的独立解释率(21.2%)显著高于土壤理化性质(3.8%),表明固沙模式通过调控酶主导草本群落的构建,而非依赖传统的土壤理化性质改良。

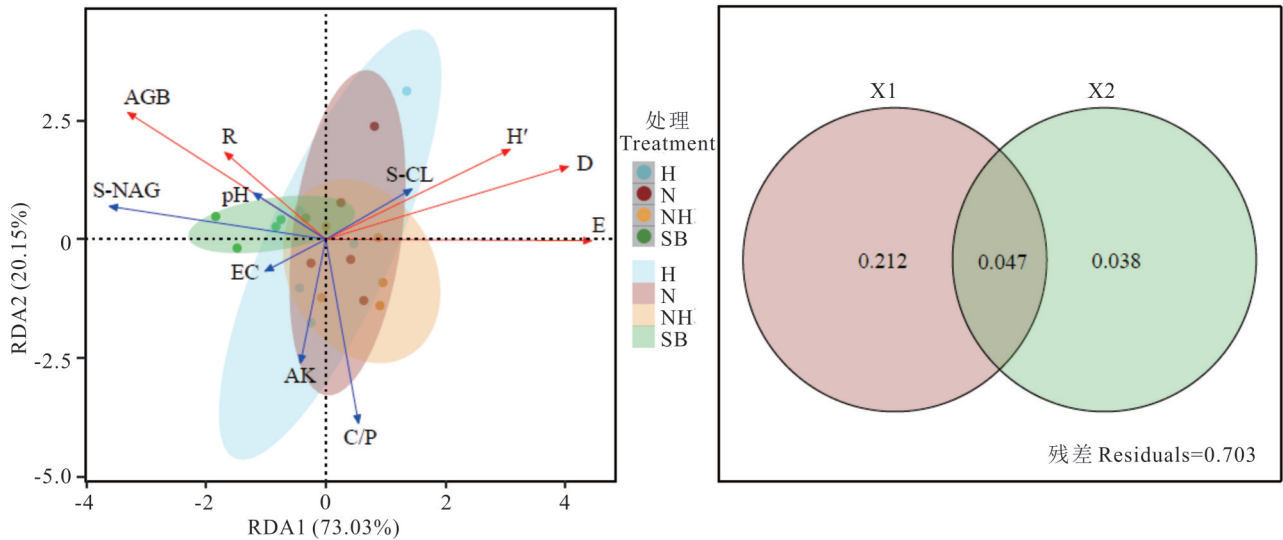


图4 不同固沙模式土壤理化性质和酶活性对草本植物的物种多样性和生物量影响的RDA分析和VPA分析

Fig. 4 RDA and VPA of effects of soil physico-chemical properties and enzyme activities on species diversity and biomass of herbaceous plants under different sand-fixing modes

置信椭圆代表不同植物固沙模式土壤理化性质和酶活性的分布情况,红色箭头表示响应变量(草本植物多样性);蓝色箭头表示解释变量(土壤理化性质和酶活性);X1:酶活性;X2:土壤理化性质。Confidence ellipse represents the distribution of soil physical and chemical properties and enzyme activity in different plant sand-fixing modes. Red arrow represents the response variable (herb diversity); blue arrows indicate explanatory variables (soil physico-chemical properties and enzyme activity). X1: Enzyme activity; X2: Soil physico-chemical properties.

### 3 讨论

#### 3.1 不同固沙植被恢复模式对土壤理化性质的影响

本研究发现在不同固沙模式下SOC含量和C/N在柠条锦鸡儿×细枝羊柴混交样地中远大于其他样地。原因在于较高的植物多样性会增加土壤碳的积累<sup>[20]</sup>,混交林的凋落物质量一般大于单一林分<sup>[21]</sup>,而SOC的矿化和累积取决于微生物群和凋落物质量,低质量容易被分解吸收,高质量容易积累<sup>[22]</sup>。本研究中不同固沙模式下的TP含量差异不显著( $P>0.05$ ),原因可能是土壤磷在长时间尺度上主要源于母质风化和大气干湿沉降<sup>[23]</sup>,短期的植被恢复措施难以改变其累积量。本研究中柠条锦鸡儿样地表现出较高的AP含量,一方面可能是因为植物在生长过程中会通过主动或被动的方式向根际分泌多种有机酸<sup>[24]</sup>,而根际有机酸对提高植物速效磷含量有重要作用<sup>[25]</sup>。另一方面,研究发现柠条锦鸡儿样地中碱性磷酸酶活性最高,碱性磷酸酶主要由根际微生物分泌,其活性高低直接反映微生物对有机磷的转化能力<sup>[13]</sup>;较高的碱性磷酸酶活性表明柠条锦鸡儿根际已富集大量高效解磷微生物,这些微生物可通过酶促反应将土壤有机磷快速转化为速效磷<sup>[26]</sup>,进一步提升根际AP水平。尽管细枝羊柴(H)及混交林(NH)样地植物根系也具备分泌有机酸的能力,但柠条锦鸡儿在有机酸分泌特性及富集解磷微生物功能方面可能更具优势,从而表现出更强的磷活化能力。进而也说明了在沙地生态系统中种植柠条锦鸡儿,对提升土壤速效磷含量、改善土壤磷素肥力具有重要实践价值。豆科植物与根瘤菌共生体系具有固氮能力强、固氮量大、抗逆性强的优点<sup>[27]</sup>,虽然柠条锦鸡儿和细枝羊柴均为豆科植物,但是在本研究中细枝羊柴样地土壤的全氮含量显著高于柠条锦鸡儿样地( $P<0.05$ )。原因可能是细枝羊柴凋落物具有低C/N<sup>[28]</sup>,分解速率快,释放大量可溶性氮,进而提高土壤全氮。细枝羊柴和柠条锦鸡儿混交时,柠条锦鸡儿凋落物木质素高<sup>[29]</sup>,分解缓慢,在氮素的利用上为了满足更好的生长,柠条锦鸡儿对氮的竞争吸收抑制了细枝羊柴的固氮优势,进而全氮含量呈现H>N>NH的趋势。安韶山等<sup>[30]</sup>发现柠条锦鸡儿根系分泌的有机酸可以降低根际pH,这一结论支持了本研究中不同固沙模式下柠条锦鸡儿样地的土壤pH显著低于其他固沙模式的发现。

#### 3.2 不同固沙植被恢复模式对土壤酶活性的影响

已有研究发现,在土壤中具备高C/N时,土壤β-葡萄糖苷酶活性较低<sup>[31]</sup>。本研究发现在不同灌木固沙模式

下 C/N 呈现  $NH > N > H$  的趋势,但土壤  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性却呈现  $N > H > NH$  的趋势,一方面可能是因为拧条锦鸡儿的凋落物木质素含量高<sup>[29]</sup>,需通过提升土壤  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性来降解碳源。另一方面土壤  $\beta$ -葡萄糖苷酶和土壤全氮显著相关,细枝羊柴土壤中过高的全氮含量抑制了土壤  $\beta$ -葡萄糖苷酶的活性。此外,土壤纤维素酶作为最重要的 C 降解酶之一,不同固沙模式下没有显著差异,而且与土壤理化性质没有显著相关性,那么可能的原因是不同固沙模式虽改变了土壤的养分特征,但是在沙地系统中负责核心纤维素降解菌的群落结构未发生显著改变<sup>[32]</sup>。本研究中沙鞭样地的土壤  $\beta$ -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶活性显著高于其他固沙模式,该酶作为降解几丁质和肽聚糖的关键酶<sup>[33]</sup>,其活性水平与土壤氮素显著相关<sup>[34]</sup>。沙鞭样地相较于其他灌木固沙措施,虽呈现较低的土壤全氮含量,却表现出更高的土壤  $\beta$ -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶活性。这种差异可能反映其适应环境氮素利用策略,通过增强  $\beta$ -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶介导的酶促反应,加速几丁质、肽聚糖等含氮有机质的分解过程,从而提高氮素矿化效率。此外,豆科植物可以通过固氮作用增加土壤氮的有效性,缓解氮限制<sup>[35]</sup>,间接增加磷酸酶活性,所以在不同固沙模式下灌木固沙措施碱性磷酸酶活性高于沙鞭样地和流动沙地。土壤 pH 作为影响土壤碱性磷酸酶的关键因素<sup>[36]</sup>,在本研究中表现出与酶活性的显著相关性。碱性磷酸酶的最适 pH 通常为  $8 \sim 10$ <sup>[37]</sup>,本研究发现拧条锦鸡儿样地的 pH(8.34)显著低于其他处理,但土壤碱性磷酸酶活性却最高,判断可能该沙地中土壤碱性磷酸酶的最适 pH 更接近于 8。

### 3.3 不同固沙植被恢复模式下草本植物多样性的特征及其驱动因子

本研究发现灌木固沙模式下草本植物多样性没有显著差异,而沙鞭样地的 Simpson 优势度和均匀度指数低于灌木固沙样地,主要原因包含两个方面:其一,拧条锦鸡儿和细枝羊柴作为深根系豆科植物,与浅根草本植物的养分吸收区隔明显,加之灌木凋落物输入,为多物种共存创造了条件;其二,豆科植物自身的固氮特性,促进了嗜氮草本植物生长;而沙鞭作为一种克隆植物,具有较强的耐寒、耐旱及抗病和抗风沙能力,能够通过根茎快速繁殖<sup>[38]</sup>,在资源贫瘠的沙地中,其他草本极易受到养分胁迫,进而造成低优势度和低均匀度的情况。同时也说明豆科灌木固沙模式有助于维持生物多样性,而依赖浅根草本植物固沙则会加速群落结构的简化。本研究发现灌木固沙样地相比较于沙鞭样地,显著改变了土壤养分和酶活性,其中  $\beta$ -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶是影响草本植物多样性的关键因子。 $\beta$ -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶作为分解几丁质和肽聚糖的关键酶,直接影响氮的矿化速率和有效性<sup>[39]</sup>。当土壤氮有效性过高时,偏好氮素的植物会抑制其他植物的生长,进而降低物种多样性。VPA 结果显示土壤酶活性对草本植物物种多样性的解释率远高于土壤理化性质。已有研究表明土壤酶可以直接反映土壤中各有机、无机营养物质的转化和有效养分的矿化速度<sup>[14]</sup>。土壤中不是所有的养分植物都可以直接吸收,例如土壤中被植物直接吸收的磷一般都以无机磷的形式存在<sup>[40]</sup>,而土壤酶活性可以通过调控有机质分解速率,动态调节养分有效性,进而影响植物的种间竞争和养分吸收过程。此外,高的植物多样性群落往往伴随着更复杂的微生物群落<sup>[41]</sup>,促进多样化酶的分泌以分解异质性凋落物,形成“高酶多样性—高效资源利用—弱化种间竞争”的正反馈机制,最终实现植物共存与多样性维持。

基于各固沙植物的功能分化,提出差异化配置建议:在磷匮乏严重的沙区,应优先选用拧条锦鸡儿,其强大的磷活化能力可以显著提升土壤磷有效性,缓解磷限制的压力;在氮素限制突出的区域,则宜以细枝羊柴为主,利用其良好的固氮能力加速土壤氮积累;而对于以提升土壤碳汇、维持有机质平衡及促进草本多样性为目标的恢复工程,推荐采用拧条锦鸡儿与细枝羊柴混交模式,既可协同提升土壤碳氮磷循环,也能通过资源互补减弱种间竞争,增强生态系统的稳定性和多功能性。此外,应谨慎依赖单一草本植物(如沙鞭)进行固沙,尽管其初期易于定植,但可能导致群落结构简化及生态系统功能单一化。因此,在沙地生态恢复中,应依据土壤养分限制类型和恢复目标,科学配置固沙物种,从而实现可持续的植被恢复与生态系统功能提升。

## 4 结论

本研究表明,植物固沙相较于流动沙地可以显著改善土壤理化性质。不同的固沙模式表现出独特的养分调控优势,拧条锦鸡儿样地土壤碱性磷酸酶活性( $0.74 \text{ nmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ )和 AP 含量( $8.73 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )最高,表现出较高的磷活化能力;细枝羊柴土壤 TN 含量最高( $0.20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),表明其通过优势固氮能力可以增加氮素积累;而二者

混交模式可以通过植物协同作用改善土壤碳氮平衡(C/N为25.13)。尽管土壤理化性质和土壤酶活性都能独立地影响草本植物多样性,但土壤酶活性因解释21.2%的变异而成为主要影响因子。研究结果为科学评价固沙植被的生态效应提供了依据,对指导植被的优化配置、提升防风固沙工程的可持续性具有重要的实践意义。

### 参考文献 References:

- [1] Zou X Y, Li J F, Cheng H, *et al.* Spatial variation of topsoil features in soil wind erosion areas of northern China. *Catena*, 2018, 167: 429–439.
- [2] Xie L N, Wu Q Q, Wang Y M, *et al.* Ecological processes of preventing arid grasslands from changing into deserts by *Caragana* shrubs. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(4): 1680–1691.  
解李娜, 吴祺琪, 王宇萌, 等. 锦鸡儿属灌木阻止干旱草地沙漠化生态过程. *生态学报*, 2024, 44(4): 1680–1691.
- [3] Chen X N, Cui B C, Gui D W, *et al.* Global temporal and spatial changes of vegetation in desert steppe ecosystems: Impacts of climate driving factors. *Ecological Indicators*, 2025, 172: 113333.
- [4] Feng X, Qu J J, Fan Q B, *et al.* Characteristics of desertification and short-term effectiveness of differing treatments on shifting sand dune stabilization in an alpine rangeland. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(24): 4968.
- [5] Jiang R S. Application of grass checkerboard sand barrier in windbreak and sand fixation. *Agricultural Disaster Research*, 2020, 10(9): 126–127.  
蒋仁山. 浅析草方格沙障在防风固沙中的应用. *农业灾害研究*, 2020, 10(9): 126–127.
- [6] Furey G N, Tilman D. Plant biodiversity and the regeneration of soil fertility. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2021, 118(49): e2111321118.
- [7] Zheng X X, Ge N, Liu Y P, *et al.* C, N, and P stoichiometry characterization in soil of *Hedysarum scoparium* community at northeastern edge of Tengger Desert. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2025, 45(1): 74–81.  
郑晓霞, 葛楠, 刘艳萍, 等. 腾格里沙漠东北缘花棒群落土壤C, N, P的化学计量特征. *水土保持通报*, 2025, 45(1): 74–81.
- [8] Li Y L, Cui J Y, Zhang T H, *et al.* Effectiveness of sand-fixing measures on desert land restoration in Kerqin sandy land, northern China. *Ecological Engineering*, 2009, 35(1): 118–127.
- [9] Zhang Y L, Chen L J, Chen X H, *et al.* Response of soil enzyme activity to long-term restoration of desertified land. *Catena*, 2015, 133: 64–70.
- [10] Wang G Z, Jia J Y, Zhang J L. Plant soil feedback theory and its applications and prospects in natural and agricultural ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(23): 9130–9143.  
王光州, 贾吉玉, 张俊伶. 植物—土壤反馈理论及其在自然和农田生态系统中的应用研究进展. *生态学报*, 2021, 41(23): 9130–9143.
- [11] Li M, Zhang E P, Zhang S H, *et al.* Comparison of soil enzyme activities and microbial C metabolism in installed vegetable fields under long-term different fertilization. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(1): 44–53.  
李猛, 张恩平, 张淑红, 等. 长期不同施肥设施菜地土壤酶活性与微生物碳源利用特征比较. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(1): 44–53.
- [12] Wang Z W, Wan S Z, Jiang H M, *et al.* Soil enzyme activities and their influencing factors among different alpine grasslands on the Qingzang Plateau. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2021, 45(5): 528–538.  
汪子微, 万松泽, 蒋洪毛, 等. 青藏高原不同高寒草地类型土壤酶活性及其影响因子. *植物生态学报*, 2021, 45(5): 528–538.
- [13] Qiao H, Mo X Q, Luo Y H, *et al.* Patterns of soil ecoenzymatic stoichiometry and its influencing factors during stand development in *Camellia oleifera* plantations. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(6): 1887–1896.  
乔航, 莫小勤, 罗艳华, 等. 不同林龄油茶人工林土壤酶化学计量及其影响因素. *生态学报*, 2019, 39(6): 1887–1896.
- [14] Mo X, Chen F J, You C, *et al.* Characteristics and factors of soil enzyme activity for different plant communities in Yellow River Delta. *Environmental Science*, 2020, 41(2): 895–904.  
莫雪, 陈斐杰, 游冲, 等. 黄河三角洲不同植物群落土壤酶活性特征及影响因子分析. *环境科学*, 2020, 41(2): 895–904.
- [15] Zhao L Y, Gao D D, Xiong B Q, *et al.* Relationship between the aboveground biomass and species diversity of sandy communities during the process of restoring succession in the Horqin Sandy Land, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(12):

- 4108—4117.
- 赵丽娅, 高丹丹, 熊炳桥, 等. 科尔沁沙地恢复演替进程中群落物种多样性与地上生物量的关系. 生态学报, 2017, 37(12): 4108—4117.
- [16] Yu S, Li X W, Wang R X, *et al.* Succession mechanism and dynamics in artificial *Caragana korshinskii* sand-fixing forests of different ages in Baijitan of Lingwu. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(3): 13—23.
- 于双, 李小伟, 王瑞霞, 等. 灵武白芨滩不同年限柠条固沙林林下草本群落演替规律及机制. 草业学报, 2024, 33(3): 13—23.
- [17] Bao S D. *Agricultural chemistry analysis of soil properties*. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 10—29.
- 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000: 10—29.
- [18] Guan S Y. *Soil enzyme and its research method*. Beijing: China Agriculture Press, 1986: 320—338.
- 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 中国农业出版社, 1986: 320—338.
- [19] Chen B L, Tang L, Chen H Q, *et al.* Dynamic changes of plant community species diversity and soil anti-scourability in Panzhuhua tailings pond. *Chinese Journal of Ecology*, 1—13. <https://link.cnki.net/urlid/21.1148.Q.20250721.1500.008>.
- 陈波兰, 唐岚, 陈辉琴, 等. 攀枝花尾矿库植物群落物种多样性和土壤抗冲性的动态变化. 生态学杂志, 1—13. <https://link.cnki.net/urlid/21.1148.Q.20250721.1500.008>.
- [20] Chen X, Taylor A R, Reich P B, *et al.* Tree diversity increases decadal forest soil carbon and nitrogen accrual. *Nature*, 2023, 618(7963): 94—101.
- [21] Guo J, Yu L H, Fang X, *et al.* Litter production and turnover in four types of subtropical forests in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(14): 4668—4677.
- 郭婧, 喻林华, 方晰, 等. 中亚热带 4 种森林凋落物量、组成、动态及其周转期. 生态学报, 2015, 35(14): 4668—4677.
- [22] Bai X J, Zhai G Q, Yan Z F, *et al.* Effects of microbial groups on soil organic carbon accrual and mineralization during high- and low-quality litter decomposition. *Catena*, 2024, 241: 108051.
- [23] Liu J Q, Liang Y, Xiao F, *et al.* Main sources of soil phosphorus and their seasonal changes across different vegetation restoration stages in Karst region of southwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(12): 3313—3321.
- 刘家齐, 梁燕, 肖凡, 等. 西南喀斯特区域不同植被恢复阶段土壤磷主要来源及其季节变化. 应用生态学报, 2023, 34(12): 3313—3321.
- [24] Guo L, Feng T Y, Xue Z Z, *et al.* Effects of nitrogen form and phosphorus fertilizer on phosphorus-solubilizing bacteria and phosphatase of maize rhizosphere in acidic red soil. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(5): 1493—1506.
- 郭龙, 冯童禹, 薛壮壮, 等. 氮形态和磷肥对红壤玉米根际解磷微生物群落和磷酸酶活性的影响. 土壤学报, 2023, 60(5): 1493—1506.
- [25] Tian J, Liang C Y, Lu X, *et al.* Mechanism of root exudates regulating plant responses to phosphorus deficiency. *Journal of South China Agricultural University*, 2019, 40(5): 175—185.
- 田江, 梁翠月, 陆星, 等. 根系分泌物调控植物适应低磷胁迫的机制. 华南农业大学学报, 2019, 40(5): 175—185.
- [26] Wang Y L, Lambers H. Root-released organic anions in response to low phosphorus availability: Recent progress, challenges and future perspectives. *Plant and Soil*, 2020, 447(1): 135—156.
- [27] Dai J X, Wang Y J, Guo J J, *et al.* Analysis of stress resistance and phylogenesis of rhizobia isolated from *Caragana* spp. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29(4): 223—227.
- 代金霞, 王玉炯, 郭晶静, 等. 荒漠植物柠条根瘤菌的抗逆性及其系统发育分析. 干旱地区农业研究, 2011, 29(4): 223—227.
- [28] Zheng H H, Yi W L, Tian M, *et al.* Ecological stoichiometry of different vegetation types in the southern margin of Mu us Sandy Land. *Journal of Baoji University of Arts and Sciences (Natural Science Edition)*, 2022, 42(1): 74—79.
- 郑浩浩, 易文利, 田苗, 等. 毛乌素沙地南缘不同植被类型生态化学计量特征. 宝鸡文理学院学报(自然科学版), 2022, 42(1): 74—79.
- [29] Xu F, Zhong X C, Sun R C, *et al.* Anatomy, ultrastructure and lignin distribution in cell wall of *Caragana korshinskii*. *Industrial Crops and Products*, 2006, 24(2): 186—193.
- [30] An S S, Huang Y M. Study on the ameliorate benefits of *Caragana korshinskii* shrubwood to soil properties in loess hilly area. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42(1): 70—74.
- 安韶山, 黄懿梅. 黄土丘陵区柠条林改良土壤作用的研究. 林业科学, 2006, 42(1): 70—74.
- [31] Ferraz-Almeida R, Naves E, Mota R. Soil quality: Enzymatic activity of soil  $\beta$ -glucosidase. *Global Journal of Agricultural*

- Research and Reviews, 2015, 3(2): 46–150.
- [32] Li Y, Kuramae E E, Nasir F, *et al.* Addition of cellulose degrading bacterial agents promoting keystone fungal-mediated cellulose degradation during aerobic composting: Construction the complex co-degradation system. *Bioresource Technology*, 2023, 381: 129132.
- [33] Zhang R, Zhou J P, Song Z F, *et al.* Enzymatic properties of  $\beta$ -N-acetylglucosaminidases. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2018, 102(1): 93–103.
- [34] Lyu L X, Song L, Liu Z L, *et al.* Response of soil enzyme activity and chemical properties to nitrogen addition in a Korean pine plantation. *Environmental Science*, 2020, 41(4): 1960–1967.  
吕来新, 宋蕾, 刘志理, 等. 红松人工林土壤酶活性与化学性质对氮添加的响应. *环境科学*, 2020, 41(4): 1960–1967.
- [35] Li Q, Huang Y X, Zhou D W, *et al.* Mechanism of the trade-off between biological nitrogen fixation and phosphorus acquisition strategies of herbaceous legumes under nitrogen and phosphorus addition. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2021, 45(3): 286–297.  
李强, 黄迎新, 周道玮, 等. 土壤氮磷添加下豆科草本植物生物固氮与磷获取策略的权衡机制. *植物生态学报*, 2021, 45(3): 286–297.
- [36] Gou X M, Ren Y Q, Qin X, *et al.* Global patterns of soil phosphatase responses to nitrogen and phosphorus fertilization. *Pedosphere*, 2024, 34(1): 200–210.
- [37] Ross M H, Ely J O, Archer J G. Alkaline phosphatase activity and pH optima. *Journal of Biological Chemistry*, 1951, 192(2): 561–568.
- [38] Liu F, Ma Z L, Liu T, *et al.* Fruiting of *Psammochloa villosa*, an endemic desert plant, under different ecological and environmental conditions. *Guihaia*, 2021, 41(9): 1457–1464.  
刘峰, 马子兰, 刘涛, 等. 不同生态环境条件沙生植物沙鞭的结实研究. *广西植物*, 2021, 41(9): 1457–1464.
- [39] Mori T. Does ecoenzymatic stoichiometry really determine microbial nutrient limitations? *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 146: 107816.
- [40] Ding N, Lin H, Zhang X H, *et al.* Interaction mechanism between root secretion and rhizosphere microorganisms: A review. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(5): 1212–1219.  
丁娜, 林华, 张学洪, 等. 植物根系分泌物与根际微生物交互作用机制研究进展. *土壤通报*, 2022, 53(5): 1212–1219.
- [41] Hu J, Amor D R, Barbier M, *et al.* Emergent phases of ecological diversity and dynamics mapped in microcosms. *Science*, 2022, 378(6615): 85–89.